



Resumen del
PROYECTO FIN DE CARRERA

MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE CÚPULAS DE HIELO A PARTIR DE PREFORMA PLÁSTICA NEUMÁTICA

realizado en colaboración con el

Doctor **Johann Kollegger**
y la
Profesora **Sonja Dallinger**

de la Universidad Tecnológica de Viena (Austria)
Departamento de Ingeniería Civil

por

Juan Ignacio Pérez Latorre
NIA 100040271
Universidad Carlos III de Madrid

Viena, Febrero 2010

INTRODUCCIÓN

En este proyecto, usaremos la palabra cúpula para referirnos a una estructura curva con cargas aplicadas sobre ella. Las cúpulas son formas funcionales de transferencia de carga cuando la mayor parte de las mismas actúan perpendicularmente a la superficie.

Las estructuras curvas han sido utilizadas en la arquitectura desde hace muchos años. Pero con la ayuda del desarrollo industrial, las técnicas y materiales se han ido ampliando y mejorando y en la actualidad podemos admirar numerosos ejemplos que han llegado hasta nuestros días.



Figura 1. Ejemplos arquitectónicos con estructuras curvas.

El hielo es un material que encontramos en la naturaleza a bajas temperaturas debido a que el punto de fusión del agua es de 0°C y del que raramente pensamos en él como material de construcción como puede ser el hormigón o la madera.

Pero las propiedades del hielo hacen que su comportamiento sea similar al hormigón en ciertas circunstancias y un material perfectamente válido para la construcción de igloos u otras edificaciones.

En el departamento de ingeniería estructural de la universidad de Viena llevan desarrollando sistemas de construcción de cúpulas desde el año 2005. Las diferentes técnicas y materiales utilizados les han otorgado la suficiente experiencia para adentrarse en el ambicioso proyecto de las cúpulas de hielo.



Figura 2. Alternativas constructivas de cúpulas.

ENSAYOS PRELIMINARES

Entre Octubre y Diciembre de 2009 realizamos tres experimentos diferentes con el fin de concretar detalles del proyecto final. Los estudios se centraron en el estudio de las deformaciones que sufrían diferentes vigas de hielo al curvarse debido a su propio peso una vez estabilizadas en distintos tipos de apoyos. La elevación se conseguía con la acción de bolsas neumáticas aplicadas bajo ellas y ayudadas de un compresor.

Las vigas de hielo se crearon por superposición de finas capas de hielo para obtener unas propiedades óptimas y añadiendo tendones de acero en su interior para mejorar la resistencia. Estas pruebas fueron realizadas en unos contenedores herméticos con control de temperatura, la cual se fijó en -20°C para la realización de los ensayos.



Figura 3. Construcción del encofrado y viga de hielo curvada.

Tras solventar algunos problemas, los resultados satisfactorios del estudio nos ayudaron a diseñar y dimensionar el proyecto final. A continuación se muestran algunos de éstos resultados.

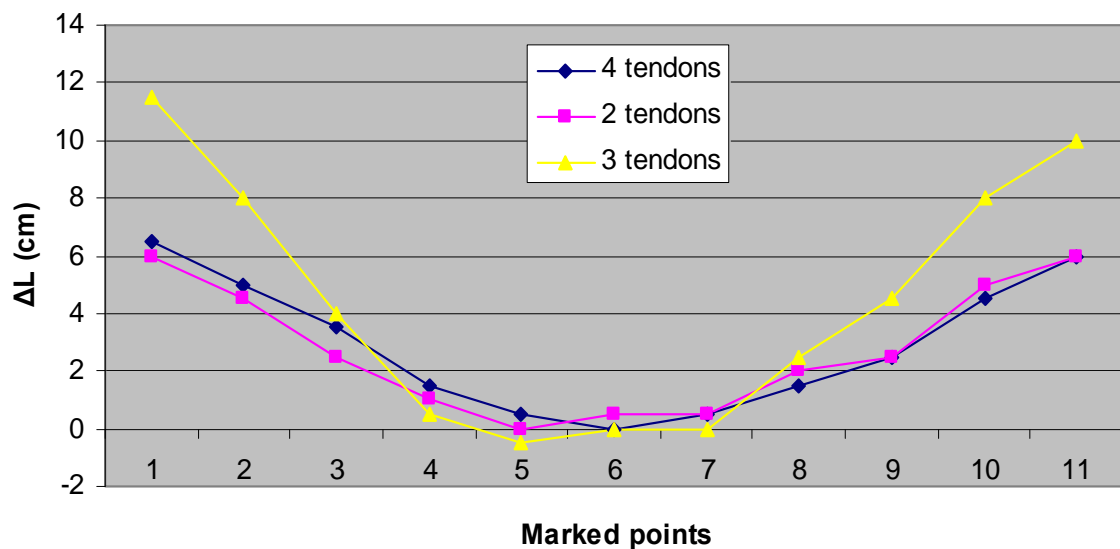


Gráfico 1. Elongación de la viga.

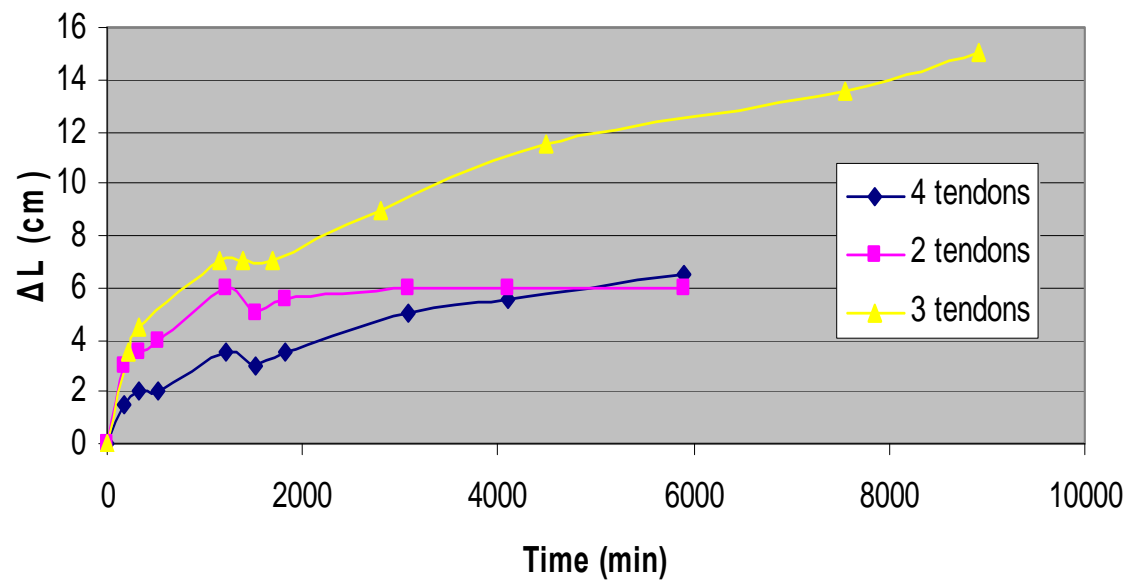


Gráfico 2. Elongación en el extremo con el tiempo.

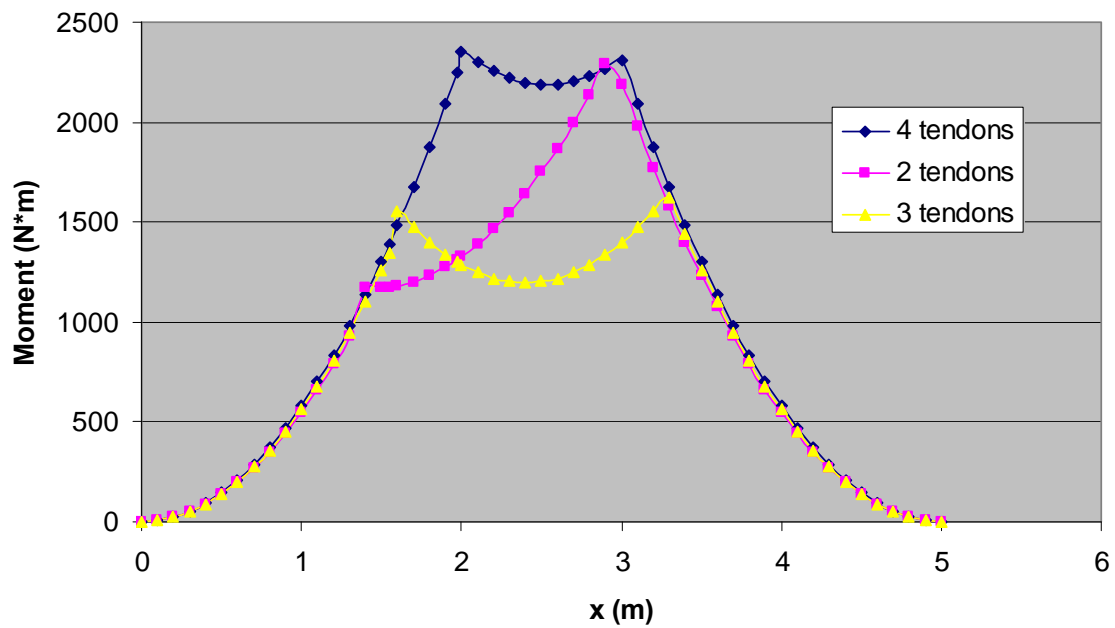


Gráfico 3. Diagrama de momentos.

A la vista del diagrama anterior, la distribución uniforme del ensayo con tres cables nos hizo inclinar el diseño en esa dirección para la realización del proyecto en Obergurgl (Austria).

NUEVO MÉTODO CONSTRUCTIVO DE CÚPULAS DE HIELO

En el invierno de 2009/2010 realizamos el proyecto de una cúpula de hielo de 10 metros de diámetro y 3,8 metros de altura mediante un método nunca antes usado y llevado a cabo en los Alpes austriacos (Obergurgl) a una altitud de 1900 metros y temperaturas entre -10°C y -25°C .

La idea fue partir una superficie plana circular de hielo en 16 porciones, elevar cada una de sus partes centrales mediante una preforma plástica neumática toroidal y finalmente levantar los extremos interiores con unas cadenas hasta lo alto de una torre de madera auxiliar construida en el centro.

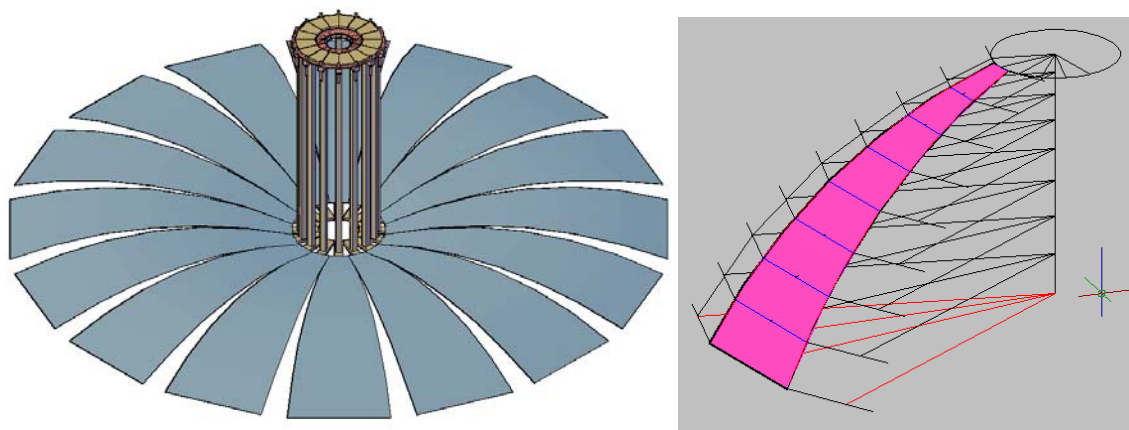


Figura 4. Diseño de los elementos constructivos.

La parte crítica del diseño se situaba en la preforma plástica bajo el pesado disco de hielo, que tendría que soportar elevadas presiones de aire en su interior, inyectadas mediante un compresor, para poder resistir el peso del hielo y todo ello sin tener fugas en los puntos de unión de los 16 elementos del enorme toroide plástico construido.

El segundo punto crítico de diseño estaba en el dimensionado del refuerzo necesario de la parte interior de cada elemento de hielo durante su elevación en comparación con su ancho. El comportamiento de esta parte sería crítico mientras que en el resto del elemento se asemejaría al ensayo con tres cables realizado tal y como muestra el gráfico siguiente.

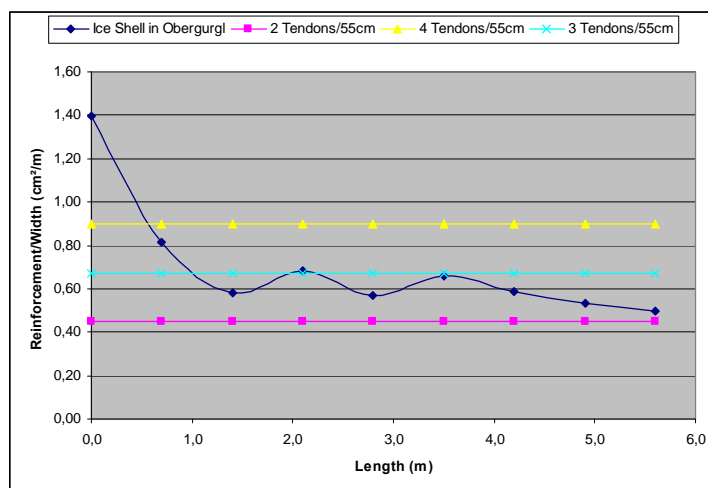


Gráfico 4. Refuerzo/ancho.

Para el cálculo numérico nos ayudamos de un programa de elementos finitos llamado RFEM4. Este programa suele usarse en el departamento para el cálculo de elementos estructurales de hormigón o acero, pero igualmente es perfectamente válido para nuestro proyecto.

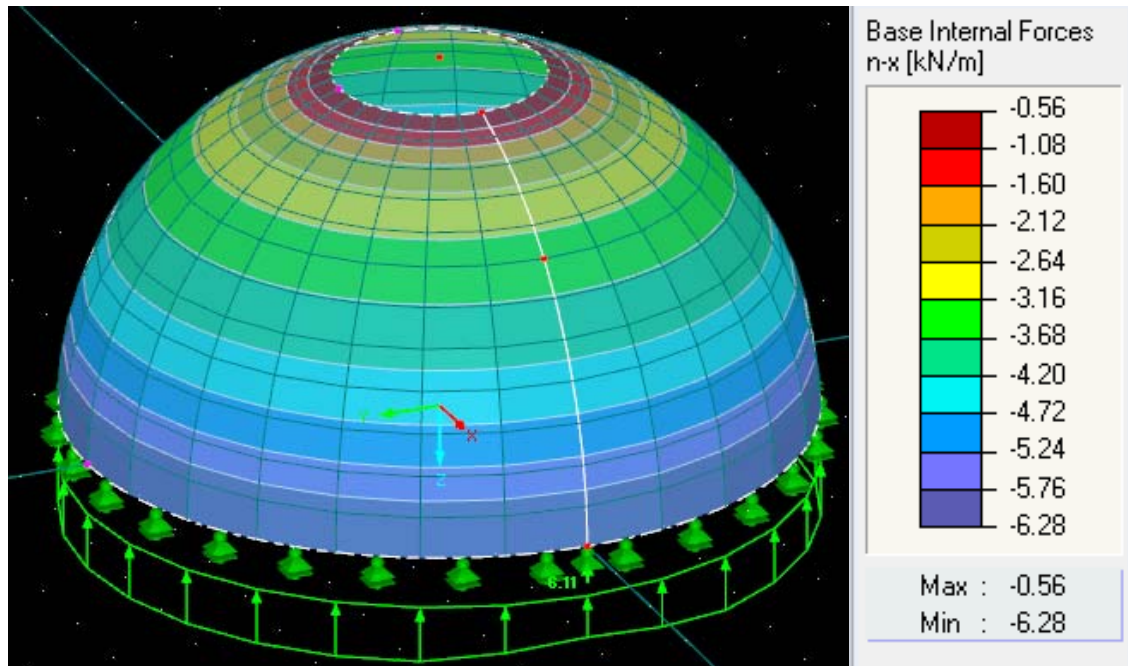


Figura 5. Cálculo de fuerzas normales.

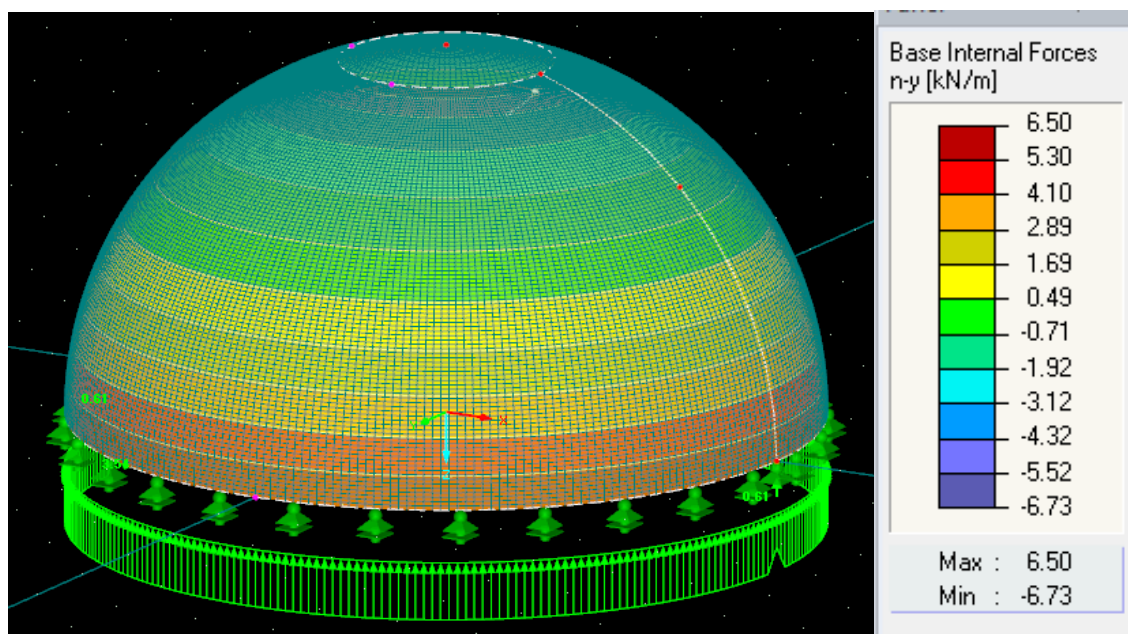


Figura 6. Cálculo de fuerzas tangenciales.

En un primer mallado (Figura 5) los resultados obtenidos mediante el programa de elementos finitos no se parecían demasiado con los cálculos analíticos realizados de manera paralela. Esto lo solucionamos replanteando el programa reduciendo el tamaño de la malla (Figura 6). A partir de ello, el programa informático resultó de gran utilidad en el diseño.

Con la fase de diseño concluida, en los talleres de la universidad comenzamos a preparar todo lo necesario para la construcción de la gran cúpula de hielo. Cargamos todo en un camión y nos dirigimos al trabajo in situ en Obergurgl (Alpes austriacos).

Con una meteorología hostil, el primer paso era preparar un terreno cedido por el Hotel Alpina dejándolo a nivel con la ayuda de un teodolito y un tractor extractor de nieve para desbastar la primera capa de nieve y hielo.

Sobre un firme a nivel de hielo procedimos a montar el encofrado del disco original de hielo y a la construcción de la torre de madera en su interior. Al igual que con los ensayos de las vigas de hielo, el disco se formó con sucesivas finas capas de agua convertidas en hielo pocos instantes después de salir de la manguera. A media altura del disco se colocó el entramado de cables de acero que aportarían la resistencia complementaria requerida.



Figura 7. Preparación del terreno e inicio de las obras.



Figura 8. Disco de hielo preparado para cortar.

Con la ayuda de motosierras comenzamos a cortar y dar forma a cada uno de los 16 elementos de diseño. Este proceso nos llevó varios días, pues debíamos tener especial cuidado en no cortar la preforma neumática puesta bajo el hielo. En ese tiempo acabamos los últimos detalles de la torre con las cadenas que levantarían los elementos de hielo en lo alto. Unos cortes en la dirección circunferencial ayudarían a los elementos a curvarse debidamente y un puente de madera que unía la torre con el exterior daría acceso a ella además de ser la referencia en la toma de medidas para el cálculo de las deformaciones.



Figura 9. Corte y preparación de los elementos de hielo.



Figura 10. Elementos preparados para la deformación.

Con el trabajo duro acabado, comenzaría el delicado proceso de la inyección de aire con el compresor a la preforma toroidal neumática. El control de la presión era fundamental en todo momento y por ello haríamos turnos de vigilancia las 24 horas. El sistema de control podía trabajar automáticamente seleccionando la presión deseada en una pantalla o bien insuflando aire cuando la presión interior decreciera de la presión atmosférica.

Al comenzar la inyección de aire tuvimos un grave error, la presión no uniforme de la preforma plástica sobre la superficie inferior de los elementos creó un momento tan elevado que algunos elementos no aguantaron con su peso propio y se partieron. Tuvimos que paralizar la obra, reparar los elementos afectados y retomar el levantamiento con mayor precaución.

En la segunda ocasión corrimos mejor suerte y tanto el levantamiento como las sucesivas deformaciones incrementales fueron por buen camino. La noche anterior al levantamiento con las cadenas y posterior ensamblado de los elementos de hielo ya deformados, quisimos elevar algo mas la presión interior y la preforma neumática no lo resistió, cayendo 12 de los elementos sobre ella. A pesar de ello, pudimos elevar los 4 elementos restantes con la ayuda de una grúa comprobando así que el método tendría futuro con algunas precauciones añadidas. En cualquier caso los resultados de las deformaciones arrojaron gran cantidad de datos a tratar para futuras modificaciones en un método vivo en continuo desarrollo en la Universidad Técnica de Viena y del que algún día obtendrán unos méritos reconocidos a la labor de un personal en el departamento con un gran potencial.



Figura 11. Proceso de levantamiento.

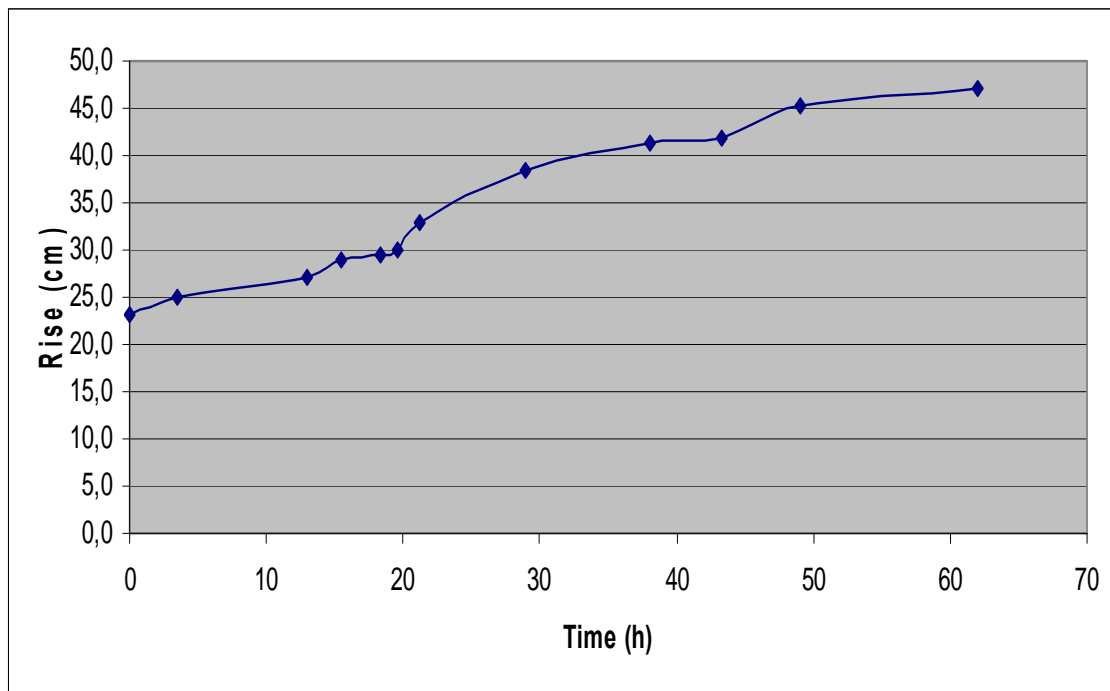


Gráfico 5. Levantamiento en el tiempo.

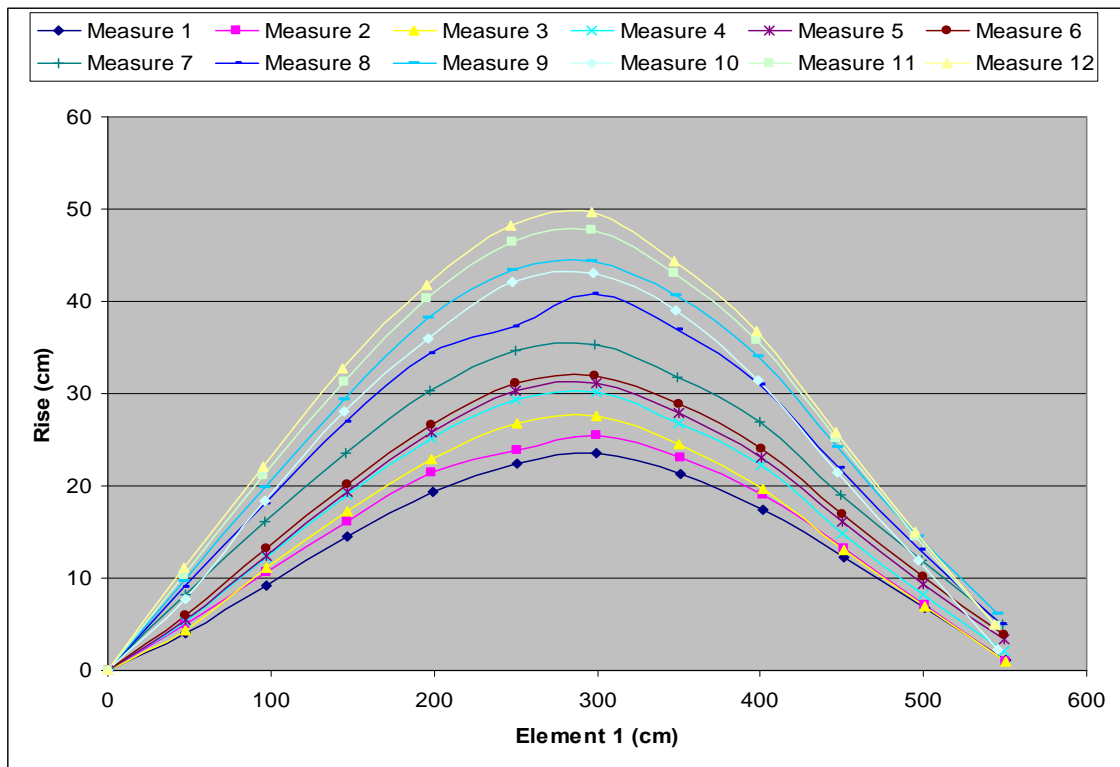


Gráfico 6. Levantamiento de uno de los elementos a lo largo de su longitud.



Figura 12. Equipo de trabajo en Obergurgl.